

## **ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ І КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ТРАНСПОРТУ НАФТИ**

**О.В. Кучмистенко, М.В. Шавранський**

ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 46067,  
e-mail: [kafatp@ukr.net](mailto:kafatp@ukr.net)

*Робота присвячена дослідженню актуальної науково-практичної задачі, яка полягає у встановленні залежностей та розробленні математичних описів, а також побудові комбінованих (статистичних та нечітких) моделей основних агрегатів магістрального нафтопроводу (станції підготовки нафти; нафтоперекачувальні станції і лінійні частини) в умовах невизначеності, пов'язаної з випадковістю і нечіткістю вихідної інформації. Запропоновано алгоритм синтезу моделей на основі нечітких рівнянь множинної регресії, за допомогою яких побудовано нечіткі моделі, що описують продуктивність агрегатів. Розроблену методику параметричної ідентифікації нечітких коефіцієнтів регресії, яка успішно апробована при оцінці нечітких коефіцієнтів розроблених моделей, можна використовувати в системі контролю з використанням дистанційних засобів комунікації.*

**Ключові слова:** магістральний нафтопровід, система автоматичного контролю, алгоритм керування, нечітка логіка.

*Работа посвящена исследованию актуальной научно-практической задачи, которая заключается в установлении зависимостей и разработке математических описаний, а также построению комбинированных (статистических и нечетких) моделей основных агрегатов магистрального нефтепровода (станции подготовки нефти; нефтеперекачивающие станции и линейные части) в условиях неопределенности, вызванной случайностью и нечеткостью исходной информации. Предложен алгоритм синтеза моделей на базе нечетких уравнений множественной регрессии, с помощью которых построены нечеткие модели, описывающие производительность агрегатов. Разработанную методику параметрической идентификации нечетких коэффициентов регрессии, успешно апробированную при оценке нечетких коэффициентов разработанных моделей, можно использовать в системе контроля с использованием дистанционных средств коммуникации.*

**Ключевые слова:** магистральный нефтепровод, система автоматического контроля, алгоритм управления, нечеткая логика.

*The work is devoted to studying of the urgent scientific and practical problem that consists in establishment of dependencies, development of mathematical formulations, and production of combined (statistical and fuzzy) models of the main trunk oil pipeline units (oil processing facilities, oil pumping stations, and linear portions) under conditions of uncertainty that is connected with the source information contingency and fuzziness. The authors of the work developed an algorithm for model synthesis of multiple regression fuzzy equations on the basis of which the fuzzy models, which describe the units' efficiency, were produced. They also developed a methodology for parametric identification of fuzzy regression coefficients that had been successfully tested in estimating fuzzy coefficients of the produced models and that could be used in the monitoring system in connection with the remote communication means.*

**Keywords:** trunk oil pipeline, automated monitoring system, management algorithm, fuzzy logics.

**Вступ.** Функціонування АСУ нафтогазового комплексу (НГК) ґрунтується на інформаційній взаємодії елементів усередині системи та інформаційних зв'язках між АСУ НГК із зовнішніми системами різного рівня. Якщо кібернетика розглядає управління передусім як процес інформаційний, то це означає, що інформація є ресурсом, на якому ґрунтується управлінська діяльність. До інформації як ресурсу висуваються абсолютно конкретні вимоги: вона має бути достовірною, своєчасною і представлена користувачеві (працівникам апарату управління, виконавцям робіт і обслуговуючому персоналу) в необхідному для прийняття рішень об'ємі. Інформація як сукупність відомостей є своєрідним нематеріальним ресурсом, що відображає реальний світ, його елементи, предмети, явища, процеси, події. При створенні конкретної АСУ (в даному випадку при розгляді АСУ НГК) реальний світ обмежений вивченням лише конкретної предметної області - системи матеріально-технічної взаємодії між елементами системи.

Питанням оптимізації об'єктів магістральних нафтопроводів приділяється достатня увага, однак більшість досліджень присвячено розгляду питань вибору оптимальної траси і виробничо-технологічним питанням окремих технологічних процесів, модернізації конкретних агрегатів, ідентифікації дефектів, автоматизації на базі досить старих технологій тощо. Для ефективного вирішення цієї проблеми необхідний системний підхід до оптимального рішення задач проектування і експлуатації технологічного комплексу нафто транспортування. Доцільно розглядати нафто транспортне виробництво як єдину систему, до складу якої входять різні підсистеми і елементи технологічного обладнання.

Для оптимального рішення вказаних завдань і проблем нафтопровідної системи слід врахувати сукупність економічних, екологічних та технологічних критеріїв ефективності роботи системи, а також скористатись сучасними досягненнями математичних методів і комп'ю-

терної технології. Тому розроблювані в даній роботі методи вибору та оптимізації на основі математичних методів і сучасної комп'ютерної технології з урахуванням факторів нечіткості частини вихідної інформації будуть вкрай важливими і актуальними.

**Завданням роботи** є формалізація нових постановок задач багатокритеріального вибору і прийняття оптимального рішення при управлінні режимами роботи нафтопровідної системи в умовах невизначеності, розроблення науково-обґрунтованих ефективних методів їх вирішення шляхом застосування методів математичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації процесу перекачування, а також побудови математичних моделей досліджуваних об'єктів в нечіткому середовищі.

**Метою даної роботи** є дослідження перспектив застосування дистанційного контролю і керування технологічними об'єктами транспортування нафти.

**Об'єктом дослідження** є технологічні процеси, що відбуваються у магістральних нафтопроводах на прикладі технологічних агрегатів (станції підготовки нафти (СПН), нафтоперекачувальні станції (НПС), лінійна частина (ЛЧ)) ділянки нафтопроводу «Самара-Лисичанськ».

Досягнення вказаної мети забезпечується шляхом розв'язання таких завдань: проаналізувати сучасний стан проблеми вибору режимів функціонування нафтопроводу та застосування математичних моделей; розглянути методи багатокритеріального вибору та прийняття рішень при управлінні технологічними агрегатами і магістральними нафтопроводами; дослідити та описати об'єкт дослідження для ділянки МН «Самара-Лисичанськ»; виконати математичний опис та моделювання процесів і агрегатів перекачування нафти трубопроводами (детерміновані варіанти); розробити математичний опис та побудувати моделі основних агрегатів досліджуваної ділянки магістрального нафтопроводу з урахуванням невизначеності.

Ступінь використання математичних моделей у процесах оптимізації і вибору раціонального рішення при управлінні реальними трубопровідними системами обмежена низкою недоліків традиційного підходу до застосування цих моделей. Основний недолік даних моделей полягає в тому, що в них основна увага приділяється детермінованим моделям, які не повністю розглядають невизначеність і не достатньо використовують наявний досвід та знання виробничого персоналу, що приймає рішення (ОПР).

Крім того, у відомих моделях інформація про варіанти, що представляють собою набори деяких характерних технологічних схем трубопроводу і набір рішень з управління, повинні бути задані заздалегідь (до етапу вирішення завдань). Математичні моделі дають змогу визначати оптимальну технологію і вибрати по-

трібне рішення. В існуючих підходах до вирішення цих завдань проблеми багатокритеріальності критеріїв мало вивчені, тому вирішення цих завдань є метою даної роботи.

Зважаючи на особливу значущість задач моделювання і вибору оптимального режиму роботи магістрального нафтопроводу потрібно створити моделі, і на їх основі приймати рішення із застосуванням комп'ютерних технологій. Це дасть змогу автоматизувати процес підготовки вихідної інформації і вибору оптимального рішення. Крім кількісної необхідно буде використовувати і якісну інформацію судження, знання і досвід фахівців-експертів.

Сутність таких систем оцінки та прийняття рішень шляхом комп'ютерного моделювання полягає в тому, що з їх допомогою визначається план траси і здійснюється вибір оптимальних параметрів нафтопровідної системи. Зміни вводяться в діалоговому режимі доти, поки не буде досягнуто задовільне ОПР рішення [1,2].

Нафтопровід в процесі експлуатації перебуває під впливом різних факторів. Одним з основних силових впливів на трубопровід є тиск перекачування, за яким розраховується товщина стінок труби, а отже, і металоемність нафтопроводу. Під час розрахунку нафтопроводу на міцність і стійкість необхідно врахувати вплив різних кліматичних, гідрологічних, підземних чинників, таких як деформація ґрунту, що виникає в районах гірських розробок та в сейсмічних районах, температурний перепад тощо. Розглянемо деякі особливості нафтопровідних систем і сформулюємо проблему оптимального керування.

Оптимальний профіль магістрального нафтопроводу повинен забезпечувати надійність та виконання всіх вимог по зменшенню напружено-деформованого стану трубопроводу, а саме вимог щодо міцності, повздовжньої стійкості, перевищення граничних деформацій труби і запобігати їй спливанню. Розглянемо ці вимоги докладніше [3].

При формалізації та вирішенні завдань оптимальної експлуатації нафтопроводу на основі сучасних математичних методів мало приділено уваги методам розроблення систем математичних моделей технологічних об'єктів нафтопровідної системи в умовах невизначеності, при нечіткості вихідної інформації, а також питанням системного моделювання технологічного комплексу магістральних нафтопроводів, що дають змогу виявляти «недоліки» комплексу і вирішувати виникаючі проблеми. Оскільки на практиці технологічні об'єкти магістральних нафтопроводів часто функціонують за наявності значних похибок вимірювання, підходи до вирішення розглянутих вище завдань в цих умовах є дуже актуальними.

Спроби поширення традиційних методів моделювання на об'єкти, які важко описати, (технологічні агрегати магістральних нафтопроводів) попри суттєвий розвиток математичних методів і засобів обчислювальної техніки, виявились безрезультатними. На практиці такими об'єктами і процесами досить добре

управляє досвідчена людина (виробничий персонал, спеціаліст, керівник) [4, 5], яка досить успішно справляється з невизначеністю і складністю. На відміну від комп'ютера, людина використовує нечіткі якісні поняття і досить успішно орієнтується у складній обстановці. У зв'язку з цим виникає проблема використання знань і досвіду людини, що є нечіткою інформацією, передавання здібностей людини комп'ютеру щоб уможливити моделювання, оптимізацію та управління складними промисловими об'єктами. Для вирішення такого завдання потрібні спеціальні методи формалізації нечіткості і обробки розмитой, якісної інформації, наприклад математичний апарат теорій нечітких множин і можливостей.

Відомі структури математичних моделей, які розробляються на основі методів теорій нечітких множин та можливостей [6]:

1. Нечіткі регресивні моделі на основі регресійного аналізу з урахуванням нечіткості вихідних параметрів (вхідні чіткі)

$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=1}^n \tilde{a}_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \tilde{a}_{ikj} x_{ij} x_{kj} + \dots, \quad (1)$$

$$j = \overline{1, m}$$

де  $\tilde{y}_j$  – нечіткі вихідні параметри системи (локальні критерії);

$x_{ij}, x_{kj}$  – вхідні вимірювані параметри модельованої системи;

$\tilde{a}_{0j}, \tilde{a}_{ij}, \tilde{a}_{ikj}$  – оцінювані нечіткі коефіцієнти.

2. Лінгвістичні моделі на основі правил логічного виведення

$$\text{Якщо } \tilde{x}_1 \in \tilde{A}_1 (\tilde{x}_2 \in \tilde{A}_2 (\dots, (\tilde{x}_n \in \tilde{A}_n) \dots)), \quad (2)$$

$$\text{то } \tilde{y}_j \in \tilde{B}_j, j = \overline{1, m},$$

де  $\tilde{x}_i, \tilde{y}_j$  – відповідно, вхідні і вихідні лінгвістичні змінні об'єкта;

$\tilde{A}_i, \tilde{B}_j$  – нечіткі підмножини, що характеризують  $\tilde{x}_i, \tilde{y}_j$ .

Наведемо основні пункти алгоритму синтезу математичних моделей на основі 1-го підходу:

Алгоритм синтезу моделей на основі нечітких рівнянь множинної регресії.

1. Вибрати необхідні для побудови моделі вхідні  $x_i \in X_i$  і вихідні  $\tilde{y}_j \in \tilde{B}_j$ , параметри об'єкта.

2. Провести збір інформації та на основі експертної процедури, визначити термножину нечітких параметрів, що описують стан об'єкта.

3. Визначити структуру нечітких рівнянь множинної регресії  $f_j(x_1, \dots, x_n, \tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$ ,  $j = \overline{1, m}$  (рішення задачі структурної ідентифікації).

4. Побудувати функцію належності нечітких параметрів об'єкта і коефіцієнтів моделі.

5. Оцінити нечіткі значення коефіцієнтів  $(\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \dots, \tilde{a}_n)$  обраних функцій  $\tilde{y}_j$  (рішення задачі параметричної ідентифікації).

6. Перевірити умови виконання адекватності моделі. У разі неадекватності моделі з'ясувати причину і повернутися до відповідного пункту, інакше модель рекомендується до застосування.

На основі вищенаведеного алгоритму побудови моделей технологічних об'єктів з урахуванням нечіткості вихідної інформації, будемо розробляти структуру математичних моделей основних технологічних агрегатів нафтопроводного комплексу: СПН; НПС і ЛЧ магістрального трубопроводу (структурна ідентифікація) досліджуваної ділянки «Самара-Лисичанськ».

**Станції підготовки нафти** (дозувальна установка для введення депресорної присадки). Для визначення впливу вхідних і режимних параметрів на вихідні параметри дозувальної установки при нечіткості деякої частини вихідної інформації на основі статистичних даних та експертної оцінки визначена структура рівняння з нечіткими коефіцієнтами, що оцінює продуктивність (3) і регресивні рівняння, що описують залежність в'язкості і тиску на виході СПН від вхідних параметрів (4):

$$\tilde{y}_1 = \tilde{a}_{01} + \tilde{a}_{11} x_{11} + \tilde{a}_{21} x_{21} + \tilde{a}_{31} x_{31} +$$

$$+ \tilde{a}_{41} x_{41} + \tilde{a}_{51} x_{11}^2 + \tilde{a}_{61} x_{21}^2 + \tilde{a}_{71} x_{31}^2 +$$

$$+ \tilde{a}_{81} x_{41}^2 + \tilde{a}_{91} x_{31} x_{41}; \quad (3)$$

$$y_j = a_{0j} + a_{1j} x_{1j} + a_{2j} x_{2j} + a_{3j} x_{3j} +$$

$$+ a_{4j} x_{4j} + a_{5j} x_{1j}^2 + a_{6j} x_{2j}^2 + a_{7j} x_{1j} x_{2j}, \quad (4)$$

$$j = 2, 3,$$

де  $\tilde{y}_1, y_j, j=2,3$  – відповідно, продуктивність, в'язкість і тиск на виході дозувальної установки;

$\tilde{a}_{01}, \tilde{a}_{1j}, \dots, \tilde{a}_{7j}$  – визначаються на основі експертної (нечіткої) інформації  $\tilde{a}_{01}, \tilde{a}_{1j}, \dots, \tilde{a}_{7j}$  регресійні нечіткі коефіцієнти;

$x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{7j}$  – чіткі регресійні коефіцієнти; відповідно, в'язкість, тиск, витрата депресорної присадки і нафти на вхід дозувальної установки.

**Насосно-перекачувальні станції.** НПС характеризується нечіткістю продуктивності, тому для них на основі описаного вище підходу і алгоритму синтезу моделей в нечіткій середовищі ідентифіковано структуру моделі (5), а для визначення тиску на виході НПС ідентифіковано структуру множинної регресії (6):

$$\tilde{y}_1 = \tilde{a}_{01} + \tilde{a}_{11} x_1 + \tilde{a}_{21} x_2 + \tilde{a}_{31} x_1^2 +$$

$$+ \tilde{a}_{41} x_2^2 + \tilde{a}_{51} x_1 x_2; \quad (5)$$

$$y_2 = a_{02} + a_{12}x_1 + a_{22}x_2 + a_{32}x_1^2 + a_{42}x_1x_2, \quad (6)$$

де  $\tilde{y}_1$  – продуктивність;

$y_2$  – тиск на виході НПС;

$\tilde{a}_{01}, \dots, \tilde{a}_{nm}$  – оцінювані нечіткі коефіцієнти (вільний член, коефіцієнти лінійної частини, взаємного впливу і нелінійної частини);

$a_{01}, \dots, a_{nm}$  – ідентифіковані коефіцієнти регресії;

$x_1, x_2$  – відповідно, тиск і густина нафти на вході насоса.

**Лінійна частина.** На основі експертних методів і модифікованого методу послідовного включення регресорів визначено нечіткі рівняння і рівняння множинної регресії, що описують роботу ЛЧ нафтопроводу:

$$\tilde{y}_j = \tilde{a}_{0j} + \sum_{i=1}^4 \tilde{a}_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^4 \sum_{k=i}^4 \tilde{a}_{ikj}x_{ij}x_{kj}, \quad j = \overline{1,2} \quad (7)$$

$$y_j = a_{0j} + \sum_{i=1}^4 a_{ij}x_{ij} + \sum_{i=1}^4 \sum_{k=i}^4 a_{ikj}x_{ij}x_{kj}, \quad j = \overline{3,4}, \quad (8)$$

де  $\tilde{y}_j, j = \overline{1,2}$  – вихідні параметри, відповідно обсяг (продуктивність) і густина нафти на виході з ЛЧ,

$y_j, j = \overline{3,4}$  – температура нафти і тиск на виході з ЛЧ;

$\tilde{a}_{0j}, \tilde{a}_{ij}, \dots, \tilde{a}_{44j}$  – ідентифіковані нечіткі і чіткі коефіцієнти регресії;

$x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}, x_{4j}$  – вхідні параметри, відповідно, обсяг нафти на вході (на початку ЛЧ), густина нафти, що поступає в ЛЧ, температура і тиск на вході ЛЧ.

Для ідентифікації нечітких коефіцієнтів (параметрична ідентифікація) розроблених моделей основних технологічних об'єктів нафтопроводної системи пропонуємо методику, засновану на об'єднанні модифікованого методу планування експериментів, експертних оцінок і теорії нечітких множин.

Ідентифікація коефіцієнтів нечітких моделей проводиться у декілька етапів:

1. На основі аналізу досліджуваного об'єкта (наприклад, СПН, НПС, ЛЧ) складається повний план «уявних» експериментів. Складання плану аналогічно складанню плану при математичному плануванні експериментів, де замість кількісних даних використовуються їх наближені значення у вигляді нечітких чисел або значення лінгвістичної змінної у вигляді нечіткої інформації (терм).

2. Фахівці-експерти на основі практичного досвіду і знань відкидають варіанти плану, які практично не реалізуються або явно призводять до аварійних ситуацій (при цьому вони повинні обґрунтувати причини виключення кожного варіанту з плану).

3. За всіма іншими варіантами експерти якісно оцінюють вплив даного співвідношення вхідних чинників на вихідні параметри об'єкта (варіанти досвіду). Оцінка здійснюється на базі терм-множин, які вибираються заздалегідь.

4. У разі невпевненості експертів при оцінці деяких варіантів ці варіанти необхідно, по можливості, реалізувати відповідно до плану і оцінити результати.

5. Оскільки, під час розгляду планів повинна брати участь група експертів, наступним етапом є визначення ступеня узгодженості їх думок за відомою методикою.

5.1 Якщо думки експертів загалом збігаються, тобто значення дисперсійного коефіцієнта конкордації близьке до 1  $WR \geq WT$ , то плати реалізуються і здійснюється перехід до обробки отриманих результатів, де  $WR, WT$  – відповідно розрахункове і табличне значення коефіцієнтів конкордації для обраного рівня.

5.2 Якщо  $WR < WT$ , тобто коли думки експертів не збігаються, їм надається можливість ознайомитися з відповідями інших експертів, проаналізувати і відкоригувати свої попередні оцінки, тобто експертна процедура повторюється.

6. Отримана інформація обробляється методами теорії нечітких множин, і визначаються конкретні значення коефіцієнтів.

Для забезпечення надійності отриманих експертних даних пропонується провести додаткову експертизу – антиекспертизу. У цьому випадку карти експертного опитування складаються з питань, протилежних за змістом до тих, на які вже отримані відповіді і побудовані функції належності  $\mu_{\tilde{A}}[x]$ . При цьому експерти повинні оцінювати ступені не приналежності нечітких параметрів до підмножини, якісно описують функціонування об'єкта. За результатами обробки отриманих даних будуються функції неналежності нечітких параметрів об'єкта до вихідних терм множин.

Якісний аналіз ступеня узгодженості оцінок можна проводити за знаннями функції приналежності та неприналежності. Для цього порівнюються різниця значень цих функцій, що описують окремий параметр декількох точок. Виділяють ті точки, в яких значення цих функцій суттєво відрізняються. Якщо є такі інтервали, то слід провести додаткове дослідження спільно з експертами, виявити причини розбіжності оцінки та відкоригувати результати.

Для вирішення завдання параметричної ідентифікації, тобто оцінки значення нечітких коефіцієнтів регресії:  $\tilde{a}_{0j}, a_{ij}, \dots$ , були досліджені критерії мінімізації відхилення нечітких значень вихідного параметра, отриманих за моделлю сформованою фахівцями-експертами  $\tilde{y}'_j$ .

На основі модифікації методу множинної регресії на випадок нечіткості і на основі запропонованої вище методики нами проведено параметричну ідентифікацію математичних

моделей основних агрегатів – ділянки нафтопроводу НПС «Великоцьк» – НПС «Лисичанськ» магістрального трубопроводу «Самара-Лисичанськ».

При оцінці (параметричної ідентифікації) нечітких коефіцієнтів нечітких моделей СПН [7], НПС і ЛЧ магістрального нафтопроводу (3) – (8), критерій має вигляд:

$$\tilde{R}_j = \min \sum_{i=1}^k (\tilde{y}_{jl}^S - \tilde{y}_{jl}^M)^2. \quad (9)$$

Для ідентифікації невідомих нечітких коефіцієнтів  $\tilde{a}_{ij}$  в рівняннях (3) – (8) нечіткі множини, що описують якісні показники продукції, розбиті на наступні підмножини рівня  $\alpha = 0,5; 0,85$

1. Відповідно до обраного рівня спостерігається значення вхідних  $X_u$  і вихідних  $y_u$  параметрів на кожному рівні  $aq$  ( $q = \overline{1,3}$ ). У цій таблиці наведено детерміновані значення вхідних і вихідних параметрів на кожному обраному рівні  $aq$ .

Для кожного рівня  $aq$  нечітких рівнянь множинної регресії (3), (5), (7) тобто нечітких моделей СПН, НПС і ЛЧ перепишемо відповідно, у вигляді такої системи (10) – (12):

$$y_{1(спн)}^{aq} = a_{01}^{aq} + a_{11}^{aq} x_{11} + a_{21}^{aq} x_{21} - a_{31}^{aq} x_{31} + a_{41}^{aq} x_{41} + a_{51}^{aq} x_{11}^2 + a_{61}^{aq} x_{21}^2 - a_{71}^{aq} x_{31}^2 + a_{81}^{aq} x_{41}^2 + a_{91}^{aq} x_{31} x_{41}, \quad q = \overline{1,3}; \quad (10)$$

$$y_{1(нпс)}^{aq} = a_{01}^{aq} + a_{11}^{aq} x_{11} - a_{21}^{aq} x_{21} + a_{31}^{aq} x_{11}^2 - a_{41}^{aq} x_{21}^2 + a_{51}^{aq} x_{11} x_{21}, \quad q = \overline{1,3}; \quad (11)$$

$$y_{1(лч)}^{aq} = a_{0j}^{aq} + a_{1j}^{aq} x_{1j} + a_{2j}^{aq} x_{2j} + a_{3j}^{aq} x_{3j} + a_{4j}^{aq} x_{4j} + a_{11j}^{aq} x_{11j}^2 + a_{22j}^{aq} x_{22j}^2 + a_{33j}^{aq} x_{33j}^2 + a_{44j}^{aq} x_{44j}^2 + a_{12j}^{aq} x_{12j} + a_{13j}^{aq} x_{13j} + a_{14j}^{aq} x_{14j} + a_{34j}^{aq} x_{34j}, \quad q = \overline{1,3}. \quad (12)$$

Оскільки ці співвідношення є системами рівняння множинної регресії, завдання ідентифікації їх коефіцієнтів зводиться до класичних задач оцінювання параметрів множинної регресії. Для вирішення останнього завдання можна використовувати відомі алгоритми або стандартні програми множинної регресії, що входять до математичного забезпечення ЕОМ. Програма працює в діалоговому режимі і дозволяє визначити коефіцієнти лінійної і нелінійної регресії з довільним числом вхідних факторів ( $x_i = \overline{1, n}$ ) [8, 9, 10].

Отримані значення коефіцієнтів  $a_{ij}^{aq}$  ( $i = \overline{0,7}$ ,  $i = \overline{1,3}$ ,  $i = \overline{1,3}$  для моделі (7),  $i = \overline{0,4}$ ,  $i = \overline{1,2}$ ,  $i = \overline{1,3}$  для моделі (8),  $i = \overline{0,4}$ ,  $i = \overline{1,4}$ ,  $i = \overline{1,3}$  для моделі (9) наведених рівнянь (7) – (9) на комп'ютері за допомогою програми **REGRESS** об'єднані з використанням такого співвідношення:

$$\tilde{a}_{ij} = a_{ij}^{aq}, a \in (0,5,1) \text{ або}$$

$$\mu \tilde{a}_{ij}(a_{ij}) = \sup \min \{a, \mu a_{ij}^a(a_{ij})\} \in (0,5,1).$$

Таким чином, рівняння, що описує нечітку залежність продуктивності дозувальної установи ( $\tilde{y}_{1(спн)}$ ) від вхідних параметрів  $x_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  (математична модель), мають вигляд (13).

Нечітка модель НПС, що описують залежність продуктивності НПС ( $\tilde{y}_{1(нпс)}$ ) від вхідних параметрів  $x_i$ ,  $i = \overline{1,2}$ , мають вигляд (14).

Математичні моделі ЛЧ описують нечітку залежність продуктивності і густини нафти від вхідних параметрів  $x_i$ ,  $i = \overline{1,4}$  мають вигляд (15-16).

Результати параметричної ідентифікації математичних залежностей в'язкості ( $y_2$ ) і тиску ( $y_3$ ) на виході СПН від вхідних параметрів ( $x$ ,  $1 = \overline{1,4}$ ) отримані за відомими методами регресійного аналізу. Після видалення доданків з нульовими (або майже нульовими) коефіцієнтами рівняння регресії має вигляд:

$$y_{2(спн)} = f_2(x_{12}, x_{22}, x_{32}, x_{42}) = 0.000001 + 0.588235294x_{22} - 0.5000000x_{22} + 0.40000000x_{32} - 0.007042254x_{42} + 0.021626298x_{12}^2 - 0.050000000x_{22}^2 + 0.029411765x_{12}x_{22};$$

$$y_{3(спн)} = f_3(x_{13}, x_{23}, x_{33}, x_{43}) = 0.000000001 - 0.023529412x_{13} + 0.320000x_{23} - 0.0320000x_{33} + 0.002253521x_{43} - 0.001384083x_{13}^2 + 0.040000000x_{23}^2 + 0.007058824x_{13}x_{23}.$$

**Параметрична ідентифікація** статистичних моделей НПС і ЛЧ нафтопроводу «Самара-Лисичанськ» побудовані на основі експериментально-статистичних даних, отриманих на основі методу найменших квадратів за допомогою програми **REGRESS**. Результати параметричної ідентифікації цих моделей мають вигляд:

• для НПС:

$$y_{2(спн)} = f_2(x_{12}, x_{22}) = 0.0000001 + 0.345360825x_{12} - 0.002315668x_{22} + 0.035604209x_{12} - 0.000000001x_{22}^2 + 0.000238729x_{12}x_{22};$$

• для ЛЧ:

$$y_{3(лч)} = f_3(x_{13}, x_{23}, x_{33}, x_{43}) = 0.000000001 - 0.00254194x_{13} - 0.00578035x_{23} + 0.73529412x_{33} - 0.7462686570x_{43} - 0.0000012920x_{13}^2 + 0.73529412x_{33} - 0.7462686570x_{43} - 0.0000012920x_{13}^2 - 0.0000066820x_{23}^2 + 0.0302768170x_{33}^2 - 0.111383382x_{43}^2 - 0.000002939x_{13}x_{23} + 0.000149526x_{13}x_{33} + 0.000510031x_{23}x_{33};$$

$$y_{4(лч)} = f_4(x_{14}, x_{24}, x_{34}, x_{44}) = 0.000000001 + 0.000350788x_{14} + 0.000797688x_{24} - 0.101470588x_{34} + 0.514925373x_{44} + 0.000000178x_{14}^2 + 0.000000922x_{24}^2 - 0.001790657x_{34}^2 + 0.076854533x_{44}^2 + 0.000000406x_{13}x_{23} + 0.00005236x_{13}x_{43} + 0.000119058x_{23}x_{43} + 0.003028973x_{33}x_{43};$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{1(cnn)} &= f_1(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{41}) = \\ &= (0.5/2.000254727 + 0.85/2.007525117 + 1/2.088235294 + 0.85/2.175725157 + 0.5/2.78751535)x_{11} + \\ &\quad + (0.5/7.0010 + 0.85/7.01000 + 1/7.1000 + 0.85/7.101523567 + 0.5/7.15652378)x_{21} - \\ &\quad - (0.5/5.00570 + 0.85/5.01250 + 1/5.680 + 0.85/5.750000000 + 0.5/5.950000000)x_{31} + \\ &\quad + (0.5/0.00370 + 0.85/0.0550 + 1/0.4000 + 0.85/0.45000 + 0.5/0.50000)x_{41} + \\ &\quad + (0.5/0.000378677 + 0.85/0.00725335 + 1/0.061418685 + 0.85/0.097733375 + 0.5/0.134457767)x_{11}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.60000 + 0.85/0.65000 + 1/0.71000 + 0.85/0.76000 + 0.5/0.82000)x_{21}^2 - \\ &\quad - (0.5/0.18030 + 0.85/0.20010 + 1/0.22720 + 0.85/0.24720 + 0.5/0.26720)x_{31}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.00000373 + 0.85/0.00007754 + 1/0.00056338 + 0.85/0.00373547 + 0.5/0.01255737)x_{41}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.00600 + 0.85/0.00700 + 1/0.00800 + 0.85/0.009000000 + 0.5/0.010000000)x_{31}x_{41}. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{1(mnc)} &= f_1(x_{11}, x_{21}) = \\ &= (0.5/76.502533912 + 0.85/76.601130723 + 1/76.701030928 + 0.85/76.801233345 + 0.5/76.901220547)x_{11} - \\ &\quad - (0.5/0.312255624 + 0.85/0.414237512 + 1/0.514285714 + 0.85/0.612377535 + 0.5/0.714123537)x_{21} + \\ &\quad + 0.5/11.00012335 + 0.85/11.00121144 + 1/11.070251886 + 0.85/11.12325777 + 0.5/11.775245888)x_{11}^2 - \\ &\quad - (0.5/0.00000338 + 0.85/0.00005467 + 1/0.00039499 + 0.85/0.002765778 + 0.5/0.010252577)x_{21}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.000375557 + 0.85/0.007725147 + 1/0.053019146 + 0.85/0.11010012 + 0.5/0.87525436)x_{11}x_{21}. \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} y_{1(лч)} &= f_1(x_{11}, x_{21}, \dots, x_{41}) = \\ &= (0.5/0.190122335 + 0.85/0.290452123 + 1/0.390442298 + 0.85/0.49044534 + 0.5/0.59033446)x_{11} - \\ &\quad - (0.5/0.24170558 + 0.85/0.34233455 + 1/0.443930636 + 0.85/0.54393054 + 0.5/0.643850557)x_{21} + \\ &\quad + (0.5/11.09411236 + 0.85/11.19112754 + 1/11.29411765 + 0.85/11.393127457 + 0.5/11.4933174)x_{31} + \\ &\quad + (0.5/28.455711317 + 0.85/28.554714415 + 1/28.65671642 + 0.85/28.75672543 + 0.5/28.857715435)x_{41} + \\ &\quad + (0.5/0.000007478 + 0.85/0.000078487 + 1/0.000198496 + 0.85/0.00113836 + 0.5/0.01218835)x_{11}^2 - \\ &\quad - (0.5/0.00000524 + 0.85/0.00005234 + 1/0.000513215 + 0.85/0.005523125 + 0.5/0.05555113)x_{21}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.132357857 + 0.85/0.231177623 + 1/0.33217993 + 0.85/0.431175345 + 0.5/0.532278877)x_{31}^2 + \\ &\quad + (0.5/4.075517557 + 0.85/4.175131745 + 1/4.27712185 + 0.85/4.37565577 + 0.5/4.4772237476)x_{41}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.006623544 + 0.85/0.0076325875 + 1/0.008612698 + 0.85/0.009615333 + 0.5/0.017512557)x_{11}x_{31} + \\ &\quad + (0.5/0.000155337 + 0.85/0.001456745 + 1/0.01456874 + 0.85/0.14522535 + 0.5/0.901335457)x_{11}x_{44} - \\ &\quad - (0.5/0.001335358 + 0.85/0.012155687 + 1/0.132516608 + 0.85/0.545789787 + 0.5/0.898557889)x_{21}x_{41}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} y_{2(лч)} &= f_2(x_{12}, x_{22}, \dots, x_{42}) = \\ &= -(0.5/0.0000000001 + 0.85/0.0000000005 + 1/0.000000001 + 0.85/0.000000005 + 0.5/0.000000010) + \\ &\quad + (0.5/0.066534780 + 0.85/0.076333505 + 1/0.086832740 + 0.5/0.096787404)x_{12} + \\ &\quad + (0.5/0.194832275 + 0.85/0.294813545 + 1/0.39491329 + 0.5/0.49183323 + 0.85/0.595723447)x_{22} - \\ &\quad - (0.5/10.027056717 + 0.85/10.0370579570 + 1/10.047058824 + 0.85/10.057057925 + \\ &\quad \quad 0.5/10.067058845)x_{32} + \\ &\quad + (0.5/12.54526856 + 0.85/12.645157875 + 1/12.746268657 + 0.85/12.847357875 + \\ &\quad \quad 0.5/12.947167578)x_{42} + \\ &\quad + (0.5/0.000024235 + 0.85/0.000034237 + 1/0.000044145 + 0.85/0.00005425 + 0.5/0.000064347)x_{12}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.00025155 + 0.85/0.00035353 + 1/0.000456547 + 0.85/0.000557538 + 0.5/0.000657895)x_{22}^2 - \\ &\quad - (0.5/0.025625278 + 0.85/0.121527278 + 1/0.221626298 + 0.85/0.322525297 + 0.5/0.423526257)x_{32}^2 + \\ &\quad + (0.5/1.703427167 + 0.85/1.801427178 + 1/1.902428158 + 0.85/1.102458147 + 0.5/1.203427167)x_{42}^2 + \\ &\quad + (0.5/0.000001002 + 0.85/0.000010037 + 1/0.000100385 + 0.85/0.00106788 + 0.5/0.01002004)x_{12}x_{22} + \\ &\quad + (0.5/0.0010024 + 0.85/0.002230027 + 1/0.003240028 + 0.85/0.004230023 + 0.5/0.005230022)x_{12}x_{42} + \\ &\quad + (0.5/0.00536574 + 0.85/0.00636774 + 1/0.007367785 + 0.85/0.008337735 + 0.5/0.009357783)x_{22}x_{42}. \end{aligned} \quad (16)$$

Значення вхідних параметрів СПН, НПС і ЛЧ, отримані в результаті обробки виробничих статистичних даних, використані при ідентифікації коефіцієнтів математичних моделей модельованих технологічних агрегатів ділянки НПС «Великоцьк» – НПС «Лисичанськ» магістрального трубопроводу «Самара-Лисичанськ».

Для СПН:

- в'язкість на вході СПН  $x_1 = 34$  мПа·с;
- тиск на вході СПН  $x_2 = 10$  кгс/см<sup>2</sup>;
- витрата палива  $x_3 = 25$  кг/год;

- обсяг нафти на вході  $x_4 = 710$  тн/год (для 1 дозувальної установки).

Для НПС:

- тиск на вході  $x_1 = 9.7$  кгс/см<sup>2</sup>;
- густина нафти на вході  $x_2 = 868$  кг/м<sup>3</sup>;

Для ЛЧ:

- обсяг нафти на вході  $x_1 = 1967$  тн/год;
- густина нафти на вході  $x_2 = 8685$  кг/м<sup>3</sup>;
- температура нафти на вході  $x_3 = 34$  °C;
- тиск на вході  $x_4 = 6.7$  кгс/см<sup>2</sup>.



В результаті математичного моделювання отримані висновки, пов'язані з оптимізацією режимів роботи досліджуваної ділянки магістрального нафтопроводу.

1. З підвищенням температури ґрунту у весняно-літній період частину дозувальних установок можна зупиняти. При цьому виникає необхідність у підвищенні в'язкості нафти на інших працюючих дозувальних установках. За рахунок зменшення експлуатаційних витрат внаслідок зупинки дозувальних установок нафти (7.6 млн. грн на рік), отримуємо певний економічний ефект (експлуатаційна витрата становить. Однак при цьому на ділянках відразу після дозувальних установок втрати в'язкості істотно зростають, що вимагатиме підвищення експлуатаційних витрат.

2. Якщо ж у роботі залишити всі дозувальні установки нафти протягом усього року, а з підвищенням температури ґрунту у весняно-літній період знижувати в'язкість нафти, то втрати в'язкості будуть істотно меншими, що забезпечить зменшення витрат на перекачування.

Таким чином, в нафтопроводах з великим обсягом перекачування нафти, яким є магістральний нафтопровід «Самара-Лисичанськ», технологія перекачування при зниженні в'язкості нафти на всіх станціях з дозувальними установками виявляється більш економічно ефективною (експлуатаційний витрата становить 2,9 млн. грн на рік).

### **Література**

1 Кологривов М.М. Инфраструктура і режими експлуатації систем газонафтоперевезення: навчальний посібник / М.М. Кологривов; під ред. В.В. Притули. – Одеса: Видавничий центр ОДАХ, 2009. – 60 с.

2 Бернер Л. И. Система поддержки принятия диспетчерских решений в АСУТП реального времени / [Бернер Л. И., Ланчаков Г.А., Никаноров В. В. и др.] // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 2. – С. 13-15.

3 Бернер Л. И. Методы и средства диспетчерского управления непрерывными технологическими процессами / Бернер Л.И., Ковалев А.А., Рошин А.В. – М.: Изд-во МАДИ, 2009. – 313 с.

4 Бернер Л.И. Проблемы проектирования и эксплуатации интегрированных систем поддержки принятия решений в многоуровневых АСУ непрерывными технологическими процессами. – М.: Изд-во Техполиграфцентр, 2010. – 210 с.

5 Селезнев В.Е. Современные компьютерные тренажеры в трубопроводном транспорте: математические модели и практическое применение / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов. – М.: МАКС Пресс, 2007. – 200 с.

6 Сериков Т.П. Интенсификация технологических объектов нефтепереработки на основе математических методов: монография / Т.П. Сериков, К.Н. Оразбаева. – Алматы: Эверо, 2006. – 150 с.

7 Оразбаев Б.Б. Задачи и методы выбора оптимального режима работы объектов нафтопровода: монография / Б.Б. Оразбаев, А.К. Мухамбеткалиева. – Алматы: Звир, 2007. – 147 с.

8 Селезнев В.Е. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, С.Н. Прялов; под ред. В.Е. Селезнева; изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: МАКС Пресс, 2009. – 436 с.

9 Sementsov G. N., Chugur I. I. Fuzzy identification of rock layers with anomalous pressure.// Proceeding of Third Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology (EUSFLAT) – Zittay (Germany). – 2003. – P. 570-573.

10 Леоненко А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и Fuzzy TECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.: ил.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
29.05.15*

*Рекомендована до друку  
професором Горбійчуком М.І.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором Петришиним Л.Б.*

*(Прикарпатський національний університет  
ім. В. Стефаника, м. Івано-Франківськ)*